

Sonolumineszenz bei 2-Frequenzanregung

MATTHIAS RÜGGERBERG und JOACHIM HOLZFUSS

Institut für Angewandte Physik, Technische Universität Darmstadt, Schloßgartenstr. 7, 64289 Darmstadt

Einleitung

Das Aussenden kurzer Lichtpulse von akustisch angeregten Blasen wird als Sonolumineszenz bezeichnet. Durch Modifikation des Anregungssignals kann erreicht werden, daß im Blasen kollaps höhere Gasdichten und -temperaturen herrschen, als bei sinusförmiger Anregung mit gleicher Schallleistung [1]. Durch zusätzliche Anregung mit der 2. Harmonischen wurde bereits nachgewiesen, daß die Lichtintensität gesteigert werden kann. Im Experiment zeigte sich jedoch, daß die Blasenposition im Schallfeld von der zeitlichen Phasendifferenz des Frequenzgemisches abhängt [2].

Experiment

In einem mit Wasser gefüllten, zylindrischen Gefäß (12 cm Höhe, 6 cm Innendurchmesser) wurde mit einem phasenfesten Mischsignal von 23.5 kHz und 47 kHz ein Stehwellenfeld angeregt. Eine injizierte Blase wird durch die sog. 1. Bjerkneskraft im Druckbauch der Grundfrequenz (23.5 kHz) in der Gefäßmitte ($z=0$) gehalten. Bei Variation der zeitlichen Phasendifferenz ϕ_t der Anregungsfrequenzen ändert sich die Position der Blase sinusförmig (Abb. 1). Die maximale Lichtintensität wird bei $\phi_t = 150^\circ$ erreicht und liegt damit nah an den in [1] vorhergesagten 166° . Durch Erhöhung der Schallamplitude sind bei $\phi_t \approx 150^\circ$ die mit Kreisen markierten Lichtintensitäten erreichbar, während mit einer 1-f-Anregung die unterbrochene Linie nicht überschritten werden kann.

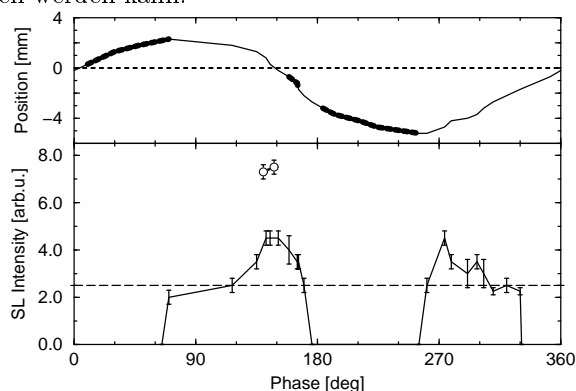


Abb. 1 2-f-Anregung mit $f_1 = 23.5 \text{ kHz}$, $p_1 \approx 1.25 \text{ bar}$ und 47 kHz , $p_2 \approx 0.3 \text{ bar}$. Vertikale Position der Blase (oben) und Intensität der Lichtpulse (unten) in Abhängigkeit von der zeitlichen Phasendifferenz. Die unterbrochene Linie markiert die Intensität bei 1-f-Anregung mit 23.5 kHz , 1.25 bar .

Gleichgewichtspositionen

Die Positionsänderungen der Blase sind in der Optimierung des Anregungssignals [1] nicht berücksichtigt. Im Experiment ist es daher schwierig, die optimalen Schallamplituden am jeweiligen Aufenthaltsort der Blase vorzugeben.

Um Einblick in die Blasenbewegung zu erhalten wurden die auf die Blase einwirkenden Kräfte in Abhängigkeit von der Position und der zeitlichen Phase berechnet. Das Stehwellenfeld wurde mit

$$p(z, t) = P_1 \cos(1/2kz) \cos(2\pi ft) + P_2 \cos(2kz + \phi_z) \cos(2\pi 2ft + \phi_t)$$

modelliert (Der Faktor 1/2 im Argument des 1. cos-Terms entspricht der exp. Beobachtung, daß die Wellenlänge dieser Stehwelle nahezu verdoppelt ist.).

Für die Blasdynamik wurde das Gilmore-Modell mit Van-der-Waals Gas verwendet [3]; der Ruherradius beträgt in allen Rechnungen $R_0 = 5 \mu\text{m}$. Mit dem numerisch berechneten Blasenradius $R(t)$ ergibt sich die 1. Bjerkneskraft und der Auftrieb:

$$F_{\text{Bjerknes}} = -\langle V(t) \text{grad}(p(z, t)) \rangle_t$$

$$F_{\text{auftrieb}} = \langle V(t) (\rho_{\text{H}_2\text{O}} - \rho_{\text{Gas}}(t)) g \rangle_t$$

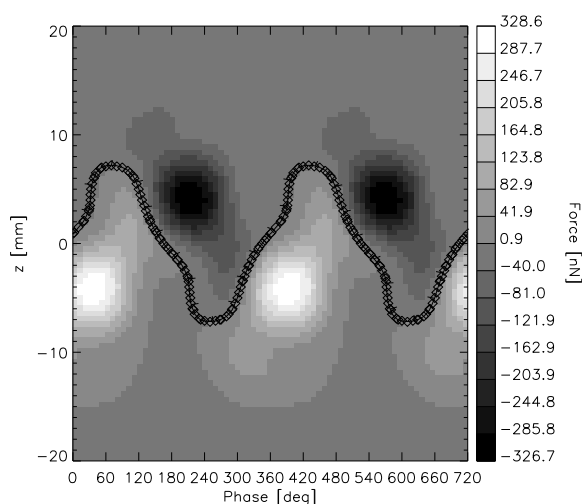


Abb. 2 Kräfteinwirkung auf die Blase. Die sinusförmige Linie markiert die Gleichgewichtsposition $F_{\text{Bjerknes}} + F_{\text{auftrieb}} = 0$ ($P_1 = 1.25 \text{ bar}$, $P_2 = 0.357 \text{ bar}$, $\phi_z = -90^\circ$). Die berechneten Blasenpositionen (Abb. 2) zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Experimenten. In Abb. 3 ist zusätzlich zur Position der jeweiligen Minimalradius der Blase dargestellt. Die räumliche Phasendifferenz der Stehwellen $\phi_z = 75^\circ$ und die Schallamplituden entsprechen ungefähr denen im Experiment (Abb. 1). In Übereinstimmung mit dem Experiment ist die Blasenbewegung wegen $\phi_z = 75^\circ$ nicht mehr symmetrisch um $z = 0$.

Der Minimalradius der Blase wird im Vergleich zur 1-f-Anregung deutlich unterschritten. Die damit einhergehenden höheren Drücke und Temperaturen in der Blase korrelieren mit der erhöhten Lichtausbeute.

Ebenso scheint sich die unterschiedliche Breite der Bereiche, in denen der Minimalradius sehr gering ist, in der Lichtintensität wiederzufinden.

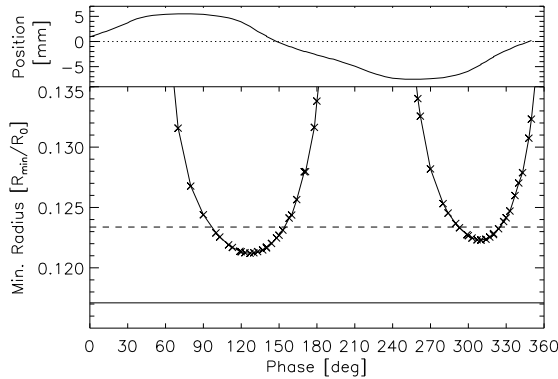


Abb. 3 Position und Minimalradius der Blase ($P_1 = 1.28\text{bar}$, $P_2 = 0.22\text{bar}$, $\phi_z = -75^\circ$). Die unterbrochene Linie markiert den Minimalradius bei 1-f-Anregung gleicher Leistung (1.3bar) und die durchgezogene Linie den Van-der-Waals Hardcore-Radius.

Instabilitäten

In Abb. 3 sind die Gleichgewichtspositionen bei steigender Amplitude der 2. Harmonischen dargestellt. Die zunächst sinusförmig variierende Blasenposition (oben) wird unstetig (mitte). Ferner treten instabile Gleichgewichtspositionen auf und es bilden sich weitere Inseln stabiler Blasenpositionen. Damit einher treten Hystereseeffekte auf, da die Blase in Abhängigkeit der Änderungsrichtung von ϕ_t auf verschiedene Wege geführt wird; dies wurde bereits im Experiment beobachtet.

Ebenfalls experimentell bestätigt ist die Multistabilität der Blasenposition (sehr ausgeprägt in Abb. 3 unten): durch Injizieren einer Blase an verschiedenen Orten im Stehwellenfeld, wird die Blase an unterschiedlichen Gleichgewichtspositionen festgehalten.

Schlußbemerkung

Die Berechnung von Gleichgewichtspositionen zeigt ein teilweise sehr komplexes, nichtlineares Verhalten bezüglich der zeitlichen Phasendifferenz ϕ_t .

Obwohl der Mechanismus der Lichtentstehung noch nicht geklärt ist, bietet die Optimierung hin zu kleinen Minimalradien eine effektive Möglichkeit, die Lichtintensität zu steigern. Bereits durch Hinzunahme einer 2. Harmonischen geringer Amplitude ist die Lichtausbeute deutlich zu erhöhen. Daneben bietet sich die Möglichkeit an, die Blase gezielt zu positionieren. Dies könnte in einem Gefäß mit einem verspiegelten, parabolischen Boden dazu dienen, die Blase im Brennpunkt zu fixieren, um somit das Licht zu parallelisieren.

Literatur

- [1] R. Mettin, J. Holzfuss, Optimierte akustische Anregung der Sonolumineszenz, Fortschritte der Akustik - DAGA 96, Hrsg. T. Portele und W. Hess, 420-421 (1996).
- [2] J. Holzfuss, M. Rüggeberg, R. Mettin, Boosting Sonolumineszenz, resubmitted to PRL, 1998
- [3] T. G. Leighton, The Acoustic Bubble, Academic Press

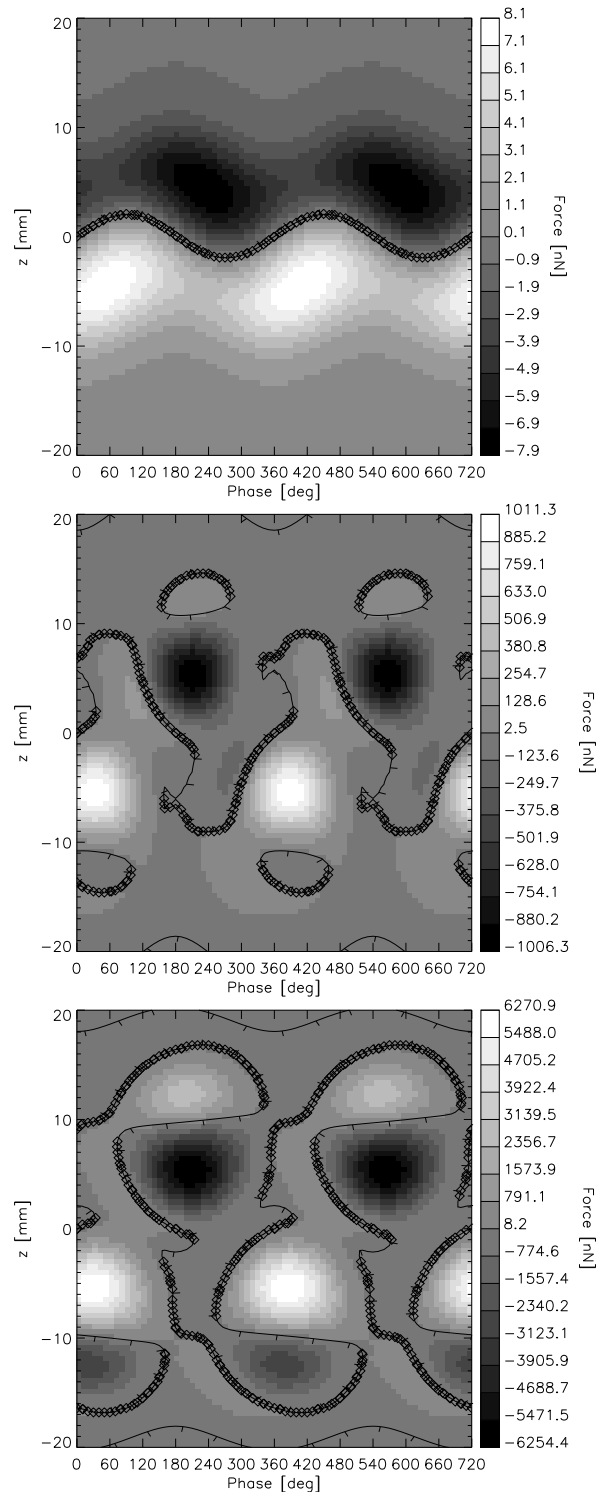


Abb. 4 Gleichgewichtspositionen der Blase ($\phi_z = -90^\circ$, $P_1 = 1.2\text{bar}$, oben: $P_2 = 0.024\text{bar}$, mitte: $P_2 = 0.6\text{bar}$, unten: $P_2 = 1.2\text{bar}$). Dünne Linien markieren instabile Gleichgewichtspositionen.